

## 昭和 60 年度石原・浅田研究助成金による研究報告

### 通気攪拌下の流体の流れと物質移動に関する研究

谷口 尚司 (東北大学工学部)

#### 1. 研究の目的

通気攪拌操作は、各種精錬プロセスにおいて広く利用されている重要な操作である。この操作により溶鉄の迅速な攪拌・混合が行われるとともに、ガス-溶鉄およびスラグ-溶鉄間の精錬速度が著しく促進される。本研究では通気攪拌特性を精錬反応との関連において明確にすることを目的とし、水および水-ベンゼン系を用いた通気攪拌実験を行い、系内の気泡分散、気-液間物質移動および液-液間物質移動の各特性を考察した。

#### 2. 気泡分散特性

直径  $2r_1=0.1\sim 1\text{ m}$  の円筒形水槽中に高さ  $z_1=0.1\sim 0.4\text{ m}$  まで水を満たし、槽底部中心のノズル(内径  $6\text{ mm}$ )から窒素を流量  $q_G=1.67\times 10^{-5}\sim 1.67\times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$  で吹き込んだ。電気探針法により槽内の局所ガスホールドアップ分布を測定した。局所ガスホールドアップの半径方向分布より半値幅  $r_{Cl-2}$  と最大値  $\sigma_0$  を求め、それぞれの  $z$  依存性をみたところ、 $r_{Cl-2}\propto z^{1.2}$  および  $\sigma_0\propto z^{-1}$  の関係を得た。この関係を理論的に検討するために、気泡の  $r$  方向の分散を乱流拡散とみなした気泡分散モデルを展開した。モデルの基礎式及び境界条件は(1)~(4)式で与えられる。

$$(\partial r u_r)/(\partial r) + \partial u_z/\partial z = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$u_r \partial u_z/\partial r + u_z \partial u_z/\partial z = \nu_e \partial (r \partial u_z/\partial r)/(\partial r) + \sigma g \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$u_r \partial \sigma/\partial r + (u_z + w) \partial \sigma/\partial z = \nu_e \partial (r \partial \sigma/\partial r)/(\partial r) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} r=0 : \sigma = \sigma_0, \quad \partial u_z = \partial r = u_r = 0 \\ r=\infty : \sigma = 0, \quad u_z = 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\nu_e$ : 乱流有効動粘度 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $w$ : 気泡の相対速度 [ $\text{m/s}$ ],  $g$ : 動力加速度 [ $\text{m/s}^2$ ].

以上の式を数値的に解くことにより、ガスホールドアップおよび流速の相似分布を求めた。分布の計算値は上記の実験結果とよく対応し、本モデルの未知パラメーター  $\nu_e$  が求められた。 $\nu_e$  と諸因子との関係をガスホールドアップに関する既往の実験値も含めて検討した結果、実験式として次式を得た。

$$\nu_e = 0.0783 g^{0.056} W^{0.36} q_G^{0.528} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $r_1 > 0.145\sim 0.3\text{ m}$ ,  $z_1/r_1 \leq 2$ .

#### 3. 気-液間物質移動特性

水- $\text{CO}_2$  系の吸収実験を行い、水中  $\text{CO}_2$  濃度の経時変化より(6)式で定義される槽内の全容量係数  $k_L a$  を求めた。

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $k_L a$ : 物質移動係数 [ $\text{m/s}$ ],  $a$ : 比表面積 ( $=A/V$ ) [ $\text{m}^{-1}$ ],  $C_s$ :  $1\text{ atm}$  の  $\text{CO}_2$  と平衡する水中  $\text{CO}_2$  濃度 [ $\text{mol/m}^3$ ].

この  $k_L a$  には気泡分散領域の  $(k_L a)_B$  のみでなく液自由表面の  $(k_L a)_S$  も含まれると考えられ、両者を分離することが必要となった。そこで槽底部より  $\text{CO}_2$  を吹込み液自由表面に窒素を吹き付けることにより二つの領域の物質移動の推進力を変化させる実験を行った。このときの水中  $\text{CO}_2$  濃度の経時変化は(7)式で与えられる。

$$\frac{dC}{dt} k_L a [\beta (C_s - C) + (1 - \beta)(C_s^* - C)] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\beta = (k_L a)_B / k_L a$ ,  $C_s^*$ : 液自由表面の  $\text{CO}_2$  分圧と平衡する水中  $\text{CO}_2$  濃度。

既に求めた  $k_L a$  の実測値を用い、 $\text{CO}_2$  濃度の経時変化を最もよく表し得るような  $\beta$  を決定し、この  $\beta$  と  $k_L a$  より  $(k_L a)_B$  および  $(k_L a)_S$  を算出した。

一方、個々の気泡に Higbie の浸透モデルを適用した物質移動モデルを用い、前述の  $\nu_e$  の実測値から  $(k_L a)_B$  の計算値を導いた。その値は実測値とほぼ一致した。

#### 4. 液-液間物質移動特性

水槽内の水の上部にアセトフェノン溶解したベンゼンを乗せ、水槽底部から窒素を吹き込んだ。アセトフェノンは水中よりもベンゼン中の溶解度が著しく大きく(平衡分配係数  $\approx 150$ )、その移動抵抗は水側のみに存在するとみなしうる。得られた容量係数  $k_L A$  はガス流量  $q_G$  が小さい領域では  $q_G^{0.5}$  に比例し、 $q_G$  が大きくなると  $q_G$  依存性が急激に増大した。その臨界ガス流量はベンゼン液滴の生成が開始する流量と対応した。ベンゼン液滴の生成がない低ガス流量域の  $k_L A$  と諸因子との関係は液高さ  $z_1$  が大きい場合の Robertson と Staple の実験式(8)式でよく整理できた。

$$k_L A = (\pi/2) \sqrt{12000 D_L^{0.5} q_G^{0.5} r_1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに  $D_L$ : 拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

また、先に求めた気-液間容量係数  $(k_L a)_S$  も(8)式でよく相関されることが示された。

以上、水および水-ベンゼン系を用いた通気攪拌実験とその解析により、気泡分散、気-液間物質移動および液-液間物質移動の特性が明確にされた。